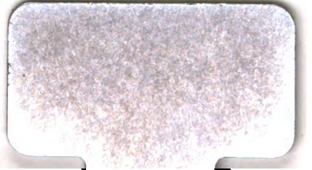



34.141
Enq 4348
AI
Pr
GODFREY L



Guillemin, C. M.

1863.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR LA

TRANSMISSION DES SIGNAUX

TÉLÉGRAPHIQUES

PAR

Claude Marie
C. M. GUILLEMIN

Agrégé de physique de la Faculté de Médecine de Paris,
Professeur à l'École militaire de Saint-Cyr,
Membre de la Commission de perfectionnement des lignes télégraphiques.

EXTRAIT DES *ANNALES TÉLÉGRAPHIQUES*,
Numéro de mars-avril 1863.

PARIS
DUNOD, ÉDITEUR,
Précédemment Carilian-Gœury et Victor Dalmont,
LIBRAIRE DES CORPS IMPÉRIAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES.
QUAI DES AUGUSTINS, 49.

1863

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR LA

TRANSMISSION DES SIGNAUX

TÉLÉGRAPHIQUES

PARIS. — TYPOGRAPHIE HENNUYER, RUE DU BOULEVARD, 7.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR LA

TRANSMISSION DES SIGNAUX

TÉLÉGRAPHIQUES

PAR

Claude Marie

C. M. GUILLEMIN

Agrégé de physique de la Faculté de Médecine de Paris,
Professeur à l'École militaire de Saint-Cyr,
Membre de la Commission de perfectionnement des lignes télégraphiques.

EXTRAIT DES *ANNALES TÉLÉGRAPHIQUES*,
Numéro de mars-avril 1863.



PARIS

DUNOD, ÉDITEUR,

Précédemment Carilian-Gœury et Victor Dalmont,

LIBRAIRE DES CORPS IMPÉRIAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,

QUAI DES AUGUSTINS, 49.

1863

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES[1]

SUR LA

TRANSMISSION DES SIGNAUX TÉLÉGRAPHIQUES

I

Propagation du courant.

Méthode expérimentale.

Les progrès de la télégraphie électrique sont nécessairement subordonnés au développement des connaissances scientifiques relatives à l'agent physique qui transmet les signaux. Cependant, jusqu'à ces derniers temps, tous les efforts ont été dirigés vers le perfectionnement des appareils et l'on s'est borné, quant à la question de physique, à prendre pour guide les notions acquises à la science depuis environ trente ans, qui comprennent les lois relatives aux courants établis d'une manière stable et permanente.

Dans la transmission des dépêches télégraphiques, les contacts de la pile et du fil se succèdent avec rapidité, et le temps que le courant met à s'établir sur une longueur

[1] Quelques-unes de ces expériences ont été déjà relatées sommairement dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* et dans ces *Annales* (t. III, p. 186 et 601 ; t. IV, p. 495). Le présent mémoire a pour but de coordonner les faits disséminés dans ces notes, de montrer leur dépendance mutuelle, et d'indiquer les applications qu'on peut en faire en télégraphie ; ce dernier point surtout le distingue des publications antérieures.

de 500 à 1,000 kilomètres est une fraction très-notable de la durée totale de chacun de ces contacts. Il en résulte que la connaissance des lois qui régissent les courants parvenus à leur état définitif et stable est insuffisante, puisque, pendant la transmission, le courant naît et cesse, ou, pour parler plus exactement, augmente et diminue dans chaque point du fil, au moins quatre ou cinq fois par seconde. Dans certains appareils le nombre des interruptions est porté à dix ou quinze dans le même temps.

Il était donc nécessaire de consulter l'expérience, pour savoir ce qui se passe dans chacun des points d'un fil télégraphique quand le courant commence à s'y répandre et quand il finit. On est convenu de réunir sous le titre de *Propagation du courant* la série des phénomènes de ce genre.

Lorsque j'entrepris ces recherches, deux opinions étaient en présence : les uns pensaient que l'électricité se propage à la manière des ondes lumineuses dans le vide ou dans un milieu homogène, les ondes marchant à la suite les unes des autres d'un mouvement uniforme. D'autres savants revenaient à une idée émise, en 1827, par Georges Simon Ohm, d'Erlangen (Bavière), d'après laquelle le courant est assujetti dans les fils métalliques à des lois analogues à celles que présente la chaleur lorsqu'elle se répand dans une barre [1].

La première opinion a été introduite dans la science par des physiciens du plus grand mérite, et l'on a pu recueillir un certain nombre de déterminations numériques dans l'espace de quelques années. Les nombres des diverses expériences faites sur des fils de fer sont tous différents

[1] *Théorie mathématique des courants électriques*, par Georges-Simon Ohm, Berlin, 1827; traduction française de J.-M. Gaugain; Paris, 1860.

entre eux, depuis 25,000 jusqu'à 180,000 kilomètres par seconde, quoique chaque recherche expérimentale ait été conduite avec le plus grand soin. Une telle divergence ne pouvait pas être attribuée à la variété des procédés d'expérience, mais bien à une erreur sur le fond de la question. D'un autre côté, les expériences de M. Faraday, sur les fils télégraphiques souterrains étendus de Londres à Manchester, indiquaient que dans ces conducteurs, où il se produit des effets de condensation analogues à ceux de la bouteille de Leyde, le temps qu'il faut à la transmission du courant est loin d'être proportionnel à la longueur des conducteurs.

D'après la considération de ces faits et d'autres analogues, plusieurs savants éminents, tels que M. Kirchhoff et M. Thomson étaient revenus à l'idée énoncée pour la première fois par Georges Simon Ohm.

Les expériences que j'ai entreprises dans ces derniers temps ont eu pour but de savoir quelle est la vraie de ces deux théories.

Il fallait, pour étudier cette question, imaginer un appareil qui permît de déterminer l'intensité que le courant présente, pendant un temps très-court, dans un point quelconque du fil, à un instant déterminé après l'établissement du contact de la pile.

Dans le cas où le courant aurait acquis son intensité définitive en un point du fil, au moment même où il commence à y paraître, et dans le cas où il eût mis à parcourir les fils des temps proportionnels à leurs longueurs, l'idée de l'analogie du mode de propagation de la lumière et de l'électricité eût été vérifiée.

Au contraire, l'expérience a nettement fait voir qu'à l'extrémité d'un fil télégraphique, loin de la pile, le courant, très-faible d'abord, augmente peu à peu, pour ar-

river à une intensité maximum qu'il ne dépasse plus. Si l'on fait des essais sur des fils de même diamètre, mais de longueur différente, on voit que, pour produire un effet déterminé, le courant emploie des temps qui augmentent plus rapidement que la simple longueur de ces conducteurs. Ces deux faits suffisent pour faire rejeter la première théorie et admettre d'une manière générale les idées fondamentales établies par Ohm.

La très-grande rapidité avec laquelle l'électricité se répand dans les fils métalliques paraissait d'abord devoir être un obstacle insurmontable à la vérification expérimentale de ces lois. En effet, il n'y a pas d'aiguille de boussole, si légère qu'elle soit, qui puisse suivre et réfléter les variations très-rapides d'un courant, quand elles se produisent dans une petite fraction de seconde; car l'*inertie* d'une aiguille, même très-légère, l'empêche, en vertu de sa vitesse acquise, de prendre à chaque instant la position qui correspond à l'intensité temporaire du courant.

Voici, en résumé, l'exposé de la méthode qui nous a servi à étudier les variations rapides des courants électriques. Concevons un fil partant du point A (fig. 1), et revenant au point B après un long trajet A C B, de telle manière que nous ayons dans un même poste ses deux extrémités. Dans le but de faciliter l'explication, supposons que le fil soit assez long pour que le courant mette environ une minute à s'y établir.

La pile communique à la terre par son pôle négatif en T et présente son pôle positif à l'extrémité A du fil télégraphique; l'autre extrémité du fil communique avec la terre en un point T′ différent de T.

Afin d'apprécier ce qui se passe en B, quand la pile touche en A, établissons un circuit de dérivation D G I B,

contenant un galvanomètre; ce circuit sera ouvert, et nous ne le fermerons qu'à certains moments, pour mesurer l'intensité du courant à ces mêmes instants. En effet, d'après les propriétés des courants dérivés, l'intensité du courant qui traverse le circuit de dérivation D G I B est une fraction constante de l'intensité du courant principal D B, quelle qu'elle soit d'ailleurs.

Fermons en A, et au bout d'une seconde établissons le contact en I, pendant 1/10 de seconde seulement. Il pourra arriver, dans cet essai, que l'aiguille reçoive une petite impulsion qui la fasse dévier de 1 degré par exemple. Supprimons après cela les contacts en A et en I; attendons un temps suffisant pour que le fil ait perdu toute son électricité, par le fil de terre T et que l'aiguille du galvanomètre soit revenue au zéro.

Nous ferons alors un second essai, semblable au premier, avec cette seule différence, qu'au lieu de laisser s'écouler une seconde entre les deux contacts, nous en laisserons écouler deux. Or, il arrivera cette fois qu'au lieu d'une déviation impulsive de 1 degré, nous en aurons une plus grande, de 2 degrés par exemple. Si nous continuons de la même manière, en laissant passer un intervalle de temps de 3 secondes entre l'établissement des deux contacts en A et en I, nous aurons une déviation galvanométrique plus grande encore que dans le second cas.

Au bout d'un certain nombre d'essais, les déviations, qui allaient d'abord en croissant, cesseront d'augmenter et l'aiguille atteindra une *déviation maximum*, quelque grand que soit l'intervalle de temps qui sépare les deux contacts.

De semblables expériences nous apprennent que le courant présente une intensité *variable* et *croissante* à l'extrémité B du fil, et qu'au bout d'un certain temps, cette intensité devient *constante* ou *permanente*. De là les déno-

minations d'*état variable* du courant et d'*état permanent*.

Les phénomènes que je viens de supposer s'accomplir avec lenteur sont au contraire d'une très-courte durée; il fallait donc imaginer une disposition expérimentale qui permît de réaliser les essais indiqués, au moyen d'une succession de contacts rapides et variables à volonté. L'appareil suivant, auquel nous avons donné le nom de *périodomètre,* paraît résoudre toutes ces difficultés.

Sur un cylindre de buis, mobile autour d'un axe ZZ (fig. 2), est fixée une lame de laiton C, de forme triangulaire, dont l'un des côtés est parallèle à l'axe. Cette lame fait corps avec une virole de même métal C′, sur laquelle appuie un ressort C″. Ce dernier communique avec le pôle positif de la pile, le pôle négatif étant à la terre en T. Un autre ressort R est fixé à un curseur mobile sur une règle parallèle à l'axe, en sorte qu'on peut le pousser vers les parties larges ou vers les parties étroites de la lame. Le fil de ligne est fixé à la règle qui touche ce ressort, et quand le cylindre tourne d'un mouvement uniforme, on peut varier comme on veut la durée des contacts de la pile, par le déplacement du ressort dans un sens ou dans l'autre.

La surface du cylindre de buis que la lame C laisse libre est recouverte jusqu'en D′ par une large lame de laiton D, isolée de la première, communiquant elle-même constamment avec un fil de terre T″, au moyen du ressort D″ qui presse sur son bord. Il résulte de cette disposition, que le fil de ligne touche la terre par le point qui a reçu le courant, un instant après que le contact de la pile est supprimé. D'un autre côté, ce même fil aboutit d'une manière permanente à la terre en T′, en sorte qu'il perd sa charge électrique, par les communications T′, T″, dans l'intervalle des contacts de la pile.

A l'extrémité E′ du cylindre de buis est disposée une

petite lame de laiton E_1 qui ferme le circuit de dérivation un instant avant que le contact de la pile ait cessé. L'intervalle de dérivation est *v r;* le circuit *r v g* E E_1 E′E″, contenant le galvanomètre, est fermé seulement quand le ressort E touche la lame de laiton E_1, qui communique avec la virole E′. Ce contact s'effectue avant que le premier ait cessé, et sa durée est relativement petite[1].

Cette disposition permettrait de réaliser facilement les essais dont il vient d'être question, si on faisait exécuter au cylindre une révolution d'un mouvement uniforme et toujours le même dans chaque essai, avec la précaution de pousser graduellement le ressort R des parties étroites vers les parties larges de la lame C. Il faut se rappeler qu'en opérant ainsi, le temps pendant lequel le courant dérivé traverse le galvanomètre est le même dans tous les cas, et qu'on fait varier seulement le temps qui s'écoule entre le moment où le ressort R commence à toucher la lame C (contact de la pile et du fil de ligne), et le moment où le ressort E touche la lame E_1 (fermeture du circuit de dérivation).

Il est difficile de faire exécuter au cylindre une seule révolution d'un mouvement uniforme; il est possible au contraire d'obtenir cette uniformité en le faisant tourner d'une manière continue. Examinons avec soin ce qui se passe dans ce cas; nous verrons que, par suite du mouvement de rotation uniforme et continu, les effets dus à l'inertie de l'aiguille se trouvent éliminés.

Pour une même position du ressort R sur la lame C, le

[1] L'appareil est représenté, figure 3, tel qu'il a été exécuté : la figure 4 représente la surface du cylindre développée sur un plan ; F et G sont des lames de décharge complémentaires, communiquant l'une et l'autre avec la virole F′G′ et le ressort F″G″ ; H et L sont de petites lames d'essai communiquant avec la virole H′ et le ressort H″.

mouvement de rotation continu reproduit à chaque tour la même série de phénomènes, et le galvanomètre reçoit un même nombre de petites impulsions égales, quinze en une seconde, par exemple, si l'appareil fait quinze tours par seconde. L'aiguille prend, dans de semblables conditions, une position fixe, et l'on a l'avantage de lire une *déviation stable*, au lieu d'une *déviation impulsive*.

Reste à savoir si, lorsque nous changeons la position du ressort R sur la lame C, les déviations du galvanomètre sont proportionnelles à l'intensité que le courant variable présente à l'instant déterminé par la succession des contacts des lames C et E_1. Les considérations suivantes montreront qu'il en est ainsi.

Dans l'intervalle des contacts de la pile, le fil perd par ses deux bouts sensiblement toute sa charge électrique, en sorte que la propagation de chacun des courants se fait toujours suivant les mêmes lois. Or, pour une même position du ressort R, et à chaque révolution du cylindre, le circuit de dérivation se ferme lorsque le courant a acquis un même degré de développement. Tous ces courants dérivés partiels sont égaux entre eux, et proportionnels à l'intensité du courant qui traverse l'intervalle de dérivation pendant le même temps. D'un autre côté, la déviation stable de l'aiguille est, comme l'ont montré les expériences de M. Pouillet, proportionnelle à l'intensité individuelle de chacun de ces courants; il s'ensuit que cette déviation est elle-même proportionnelle à l'intensité du courant qui traverse l'intervalle $v\ r$, lorsque le circuit de dérivation est fermé.

Si donc, en déplaçant le ressort R, on fait varier à volonté le temps qui s'écoule entre le moment du contact de la pile et le moment précis où se ferme le circuit de dérivation, le galvanomètre donnera pour les diverses

positions du ressort, des nombres proportionnels à l'intensité des courants qui traverseront alors l'intervalle *v r* de dérivation. Nous admettons ici, pour plus de simplicité, que dans la limite de 20 à 25 degrés, les déviations du galvanomètre sont proportionnelles aux intensités des courants.

Il faut une certaine habitude pour tirer de cet appareil toutes les indications qu'il peut donner. Sans entrer dans le détail des précautions expérimentales que l'usage apprend toujours assez facilement, je me bornerai à indiquer les points les plus importants.

Les ressorts vibrent et cessent d'établir de bons contacts, dès qu'un point de la surface qu'ils pressent fait plus de 40 centimètres par seconde. Pour des vitesses plus grandes, il faut empêcher les vibrations par des étouffoirs semblables à ceux qui servent à éteindre le son des cordes des pianos.

Le métal et le bois doivent présenter une surface unie et continue; en travaillant avec soin le cylindre sur le tour, on parvient à lui donner une surface assez régulière, malgré les différences de dureté du laiton et du buis.

Il est très-difficile d'avoir un mouvement de rotation uniforme. Après un grand nombre d'essais, nous avons repris notre premier procédé, qui consiste à lier la poulie L de l'appareil (fig. 3) à un volant en fonte de 60 centimètres de diamètre, du poids de 12 kilogrammes : ce volant porte sur sa circonférence un petit taquet qui frappe à chaque tour de roue un corps élastique, comme une plume à écrire, en produisant un bruit sec. Il suffit d'accorder ce bruit avec celui d'une horloge qui bat la seconde; après s'être exercé pendant quelque temps, on parvient à une régularité de mouvement très-suffisante.

Un petit compteur à roues différentielles K donne exac-

tement la vitesse de rotation. D'un autre côté, par des opérations préalables, on évalue en arc l'étendue de chaque contact au moyen d'un cercle divisé X, muni d'un vernier V, qui permet d'apprécier les minutes. La durée des contacts se déduit directement de ces deux données : vitesse de rotation; longueur exprimée en arc de chaque communication métallique.

En général, il ne faut tenter des expériences que quand l'atmosphère est calme et l'isolement assez bon. L'aiguille ne conserve aucune position fixe pendant les temps humides et variables, ni même par les temps secs, lorsqu'il fait beaucoup de vent. Les belles journées du printemps et de l'automne ont été très-favorables ; il est probable cependant que les temps froids et secs de la fin de l'hiver conviennent mieux encore pour des recherches de cette nature.

II

Durée de l'état variable.

Les nombreuses expériences que j'ai faites sur la propagation des courants, tant à Nancy, avec la collaboration de mon ami M. Emile Burnouf, qu'à la station centrale de Paris, ont toutes abouti à des résultats concordants entre eux. Il suffira, pour en donner une idée, de rapporter quelques séries de nombres.

Période d'intensité croissante du courant, loin de la pile.

	2	3	5	6	8	10	13	14	15	16	17	18	27	etc.
(1)	0°,5	1°	4°	11°	17°	20°	22°	23°,5	24°,5	24°,5	24°,7 ‖	25°	25°	25°

La première ligne contient les temps exprimés en millièmes de seconde; les déviations galvanométriques sont dans la seconde ligne.

Cette expérience a été faite à la station centrale à Paris, par un temps sec et froid, sur la ligne de Paris, Tours, le Mans, avec retour à Paris, d'environ 550 kilomètres de fils de fer de 4 millimètres de diamètre, avec mélange de fil de 3 millimètres. La pile était composée de 60 éléments Bunsen. On voit que l'intensité du courant est *croissante,* à l'extrémité de la ligne, loin de la pile, mais qu'au delà de 18 millièmes de seconde de contact avec la source électrique, le courant n'augmente plus sensiblement.

Période d'intensité décroissante du courant, près de la pile. — Une autre expérience montrera les variations du courant dans les points du fil qui avoisinent la pile.

	0,3	1	1,2	2	3	5	7	11	14	15	17	24	etc.
(2)	52°	32°	28°	24°	17°	16°,7	15°,5	15°,5	15°,25	15°,25 ‖	15°	15°	15°

Ligne passant par le Mans, Lisieux (fils directs), longueur 570 kilomètres environ ; pile de 22 éléments Bunsen; température de 12 degrés; temps très-favorable.

Ces nombres font voir clairement que dans le voisinage de la source électrique, à l'inverse de ce qui se passe à l'autre bout du fil, le courant *décroît* à mesure que le temps s'écoule. La déviation atteint une intensité minimum à l'instant même où elle a son intensité maximum à l'autre extrémité. Ce dernier point a été vérifié par deux expériences comparatives faites sur le même fil.

La *période décroissante* s'explique aisément d'après cette loi, que deux électricités de même nom se repoussent. Au moment où le contact du pôle de la pile et du fil est établi, l'électricité se précipite en grande quantité dans le conducteur, parce qu'il n'existe aucune tension électrique de même nature qui lui fasse obstacle; mais, à mesure que le fil se charge, l'électricité qu'il possède

agit par répulsion sur celle qui vient de la pile; il en prend une quantité de moins en moins grande dans le même temps; c'est pour cette raison que le courant diminue jusqu'à ce que le mode de distribution définitif des tensions électriques soit établi dans tous les points du fil.

On peut représenter graphiquement ces variations du courant (fig. 5), en comptant les temps sur la ligne ox et en exprimant les intensités des courants par des droites parallèles à oy. Si l'on joint les sommets de ces droites, une courbe de la forme ors figurera la *période d'intensité variable et croissante* du courant; la courbe $yr's'$ figurera la *période décroissante* du courant, près de la pile. Les deux droites parallèles à ox représentent l'*état permanent* et définitif du courant en chacun des points du fil, 18 millièmes de seconde après que le contact de la pile a été établi.

Un fil de ligne perd toujours une partie de son électricité, tant par l'air que par les supports, malgré les précautions qu'on a prises pour l'isoler; il s'ensuit qu'à partir du moment où l'état permanent est établi, le courant est plus fort près de la pile que dans tous les autres points, et son intensité va graduellement en décroissant jusqu'à l'autre extrémité.

L'*état permanent* est caractérisé ici par l'invariabilité du courant dans chaque point du fil; mais lorsque l'isolement est absolu, tout devient uniforme, et l'intensité du courant est la même dans tous les points.

La différence entre l'intensité du courant à chaque extrémité est d'autant plus grande que le temps est plus humide. Quand l'air est sec, cette différence sur les fils de 500 kilomètres que nous avons essayés est au moins d'un quart ou même d'un tiers de l'intensité près de la pile.

Par les temps très-chargés d'humidité, il n'arrive souvent au bout du fil que la sixième ou même la huitième partie du courant qui entre par l'autre extrémité.

Ces notions reçoivent une application très-directe en télégraphie. Dans les appareils où l'on fait enregistrer la dépêche au point de départ comme au point d'arrivée, pour abréger le *collationnement,* ce sont deux courants tout à fait différents l'un de l'autre, tant par l'intensité que par le mode de variation qui animent les électro-aimants. Des mouvements synchroniques peuvent encore être produits par des courants si dissemblables, lorsque les contacts se succèdent avec peu de rapidité, comme dans la transmission ordinaire. Mais lorsque les contacts deviennent plus nombreux dans le même temps, il est souvent impossible d'obtenir la concordance des mouvements.

Les appareils dans lesquels on cherche à avoir le synchronisme au moyen du courant fonctionnent bien dans le cabinet d'expérience, où la ligne est remplacée par des bobines résistantes, parce que dans ces dernières l'état variable a très-peu de durée, le fil est bien isolé et il ne survient aucun trouble comme ceux qui proviennent des changements atmosphériques. L'emploi de la ligne amène toutes les différences qui viennent d'être signalées, et introduit en outre d'autres difficultés provenant de la charge électrique du fil et dont il sera bientôt question.

Analogie du mode de propagation de la chaleur et de l'électricité. — Ces périodes croissantes et décroissantes, qui caractérisent l'état variable du courant aux deux extrémités de la ligne, confirment l'analogie qu'Ohm a établie entre la propagation de la chaleur et celle de l'électricité.

Afin de nous rendre compte du mouvement de la chaleur dans les corps, imaginons qu'on plonge l'extrémité A (fig. 6) d'une barre métallique dans un foyer S, dont la

température est très-élevée. Dès les premiers instants, la tranche A prend une température voisine de celle de la source et la tranche C s'échauffe par la chaleur qui se répand de A en C. A mesure que le temps s'écoule, la température de C approche de plus en plus de celle de A, la quantité de chaleur qui passe entre ces deux tranches pour échauffer la seconde diminue avec la différence de leurs températures, et le courant de chaleur va *décroissant* avec le temps.

A l'autre extrémité de la barre, les variations sont différentes. La tranche D n'est pas, à l'origine, plus chaude que la tranche E ; aussi n'y a-t-il pas, à proprement parler, de courant calorifique de D en E. Mais bientôt la tranche D reçoit de la chaleur et elle en cède à la tranche E. La température de la première augmente plus rapidement que celle de la seconde, puisqu'elle est plus voisine de la source ; le courant de D en E va donc sans cesse en *croissant*. Ici, comme précédemment, la quantité de chaleur qui passe d'une tranche à l'autre est proportionnelle à la différence de leurs températures.

La théorie indique ces phénomènes et l'expérience les a mis en évidence. On voit par là que, dans chaque point de la barre, le courant calorifique varie pendant un temps plus ou moins long. Ce courant diminue dans les parties voisines de la source et augmente dans celles qui sont éloignées. Au bout d'un certain temps, les températures deviennent invariables dans tous les points de la barre ; alors à l'*état variable* des températures et du courant calorifique succède l'*état permanent*.

Ces variations de température sont très-lentes et mettent plusieurs heures à s'accomplir dans une barre de 2 centimètres d'épaisseur. Les variations électriques se produisent dans un temps relativement très-court. Il fallait

à la fois, chez le physicien allemand, une grande pénétration d'esprit et beaucoup de hardiesse pour rapprocher des phénomènes si différents en apparence.

Attraction de l'armature du récepteur. — On doit se demander quelle relation il y a entre cette variation croissante du courant à l'extrémité de la ligne et le mouvement de l'armature de l'électro-aimant du récepteur. Est-il nécessaire, par exemple, que le courant ait atteint l'état permanent pour que le mouvement se produise?

Il était naturel de penser que l'armature est attirée du moment où le courant possède assez d'intensité pour donner au fer une force magnétique suffisante au jeu de l'appareil, que l'état permanent soit ou non établi. Cependant on pouvait croire aussi que le courant induit développé dans le fil de l'électro-aimant, sous l'influence de la période croissante, ou autrement l'*extra-courant,* dût contrebalancer, en partie du moins, l'action du courant principal sur le barreau de fer doux.

L'expérience a montré que l'armature est attirée lorsque le courant est encore dans sa période croissante, et qu'une certaine intensité moyenne suffit à cet effet, sans qu'il soit besoin de l'état permanent du courant. De là cette conséquence importante dans la pratique : *pour une bonne transmission télégraphique, il n'est pas nécessaire que le courant atteigne son intensité maximum à chaque émission et cesse après chaque contact; il suffit de produire des variations déterminées dans l'intensité du courant qui anime l'électro-aimant du récepteur.* Nous reviendrons plus loin, avec détails, sur ce sujet (p. 24).

Loi du carré de la longueur. — Le service régulier exige qu'on transmette à des distances quelconques par tous les temps. Il est donc d'un grand intérêt de rechercher quelle influence la longueur du fil exerce sur la propagation du

courant, et les modifications qui surviennent lorsque la perte par l'air et par les supports augmente.

Jusqu'à présent, il ne m'a pas été possible de traiter complétement la première question; cependant il résulte une indication assez évidente des expériences que j'ai faites sur des fils de 280, 380 et 570 kilomètres.

On déduit de la théorie d'Ohm que la durée de l'état variable du courant croît comme le carré de la longueur, pour des fils de même nature, de même diamètre, et de longueurs différentes.

Les personnes qui connaissent l'installation des lignes savent combien il est difficile actuellement d'avoir des fils de fer d'égal diamètre, placés dans des conditions identiques. Les nombres que nous avons obtenus sur plusieurs lignes ne sont donc pas très-comparables entre eux; je citerai cependant des résultats provenant tant des expériences faites à Nancy que de celles de Paris, dans lesquelles on a employé de 60 à 66 éléments Bunsen.

Ligne de Nancy à Strasbourg, aller et retour sur les mêmes poteaux, longueur 280 kilomètres; durée de l'état variable. . . . 0″,0045
Ligne de Paris, Epernay, Reims, Laon, Paris, 380 kilomètres. 0″,0100
Ligne du Mans, Alençon, Lisieux, 570 kilomètres; nombre moyen. . . . . 0″,0180

Les durées d'état variable sont entre elles comme les nombres.	1	2,2	4
Les rapports des longueurs des fils sont.	1	1,35	2,03
Les rapports des carrés de ces mêmes longueurs sont	1	1,82	4,12

On voit d'une manière générale que les nombres qui expriment la durée de l'état variable se rapprochent beaucoup plus de la loi des carrés que de la loi des simples longueurs.

Marche asymptotique du courant. — Il résulte des nombres cités plus haut que le courant arrive à son état défi-

nitif par une marche asymptotique, comme le montre la figure 5; dans la série (1), page 14, du temps 5 au temps 6, le courant s'élève de 7 degrés pour 1 millième de seconde de différence; plus tard, du temps 15 au temps 18, pour une différence triple, il ne s'élève que de 1/2 degré. D'après la théorie, la durée de l'état variable doit différer considérablement suivant la quantité qu'on néglige comme insensible dans la déviation galvanométrique. Les nombreuses déterminations que j'ai faites sur un même fil me donnaient cependant toujours à peu près les mêmes nombres pour une même pile et pour un même état d'isolement du fil. La sensibilité du galvanomètre pouvait être modifiée, sans qu'on remarquât dans les nombres de changement bien notable. Ce fait est peut-être moins en désaccord avec la théorie qu'il ne semble au premier abord; je me propose de le discuter de nouveau, dès qu'il se présentera une occasion favorable.

Isolement de la ligne. — L'état variable dure d'autant moins, ou, pour parler autrement, le courant se propage avec d'autant plus de rapidité que le fil est mieux isolé. Lorsqu'on détruit l'isolement du fil par une communication imparfaite à la terre, la durée de l'état variable augmente notablement; l'effet est très-marqué, quand la surface de la pile est petite. C'est pour cette raison que, par les temps humides, lorsque l'isolement est très-mauvais, on a plus d'avantage à augmenter la surface que le nombre des éléments. Une source électrique abondante suffit à toutes les pertes, et le courant acquiert, au bout de la ligne, l'intensité nécessaire dans un temps moindre.

J'ai comparé, pour la transmission rapide, la pile de Bunsen à la pile de Daniell. Pendant une grande pluie, 100 éléments Daniell étaient incapables de faire marcher l'appareil Morse au moyen du fil de 570 kilomètres; la sub-

stitution de 60 éléments Bunsen aux 100 éléments Daniell a permis de passer, par le même fil, 45 mots par minute.

D'après M. J. Regnauld, 3 éléments Bunsen ont à peu près la même tension que 5 éléments Daniell ; les éléments Bunsen que nous avons employés sont de petites dimensions ; le zinc a 100 centimètres carrés de surface, le vase poreux 50 centimètres cubes de capacité ; malgré ces faibles dimensions, chacun d'eux équivaut, pour la surface, à 10 ou 12 éléments Daniell environ ; de là vient la supériorité de la pile de Bunsen par les temps très-humides.

Influence de l'énergie de la pile. — D'après ce qui précède, la durée de l'état variable diminue par une augmentation de la surface de la pile, surtout quand le fil est mal isolé. Quelques nombres montreront dans quelle limite ces changements s'effectuent lorsque, en conservant un même fil, on fait varier le nombre et la surface des éléments.

Ligne de Paris, Lisieux, Caen, le Mans, Paris, 6 février ; longueur, 570 kilomètres ; air un peu humide ; ciel pur ; vent assez fort ; température voisine de zéro. Les déviations de l'aiguille ont été assez stables ; par moment, cependant, les oscillations obligeaient d'interrompre les expériences.

20 éléments Bunsen. . .	0″,024	60 éléments Bunsen. . .	0″,021
40 — — . . .	0″,022	80 — — . . .	0″,020

Ligne de Paris, le Mans, Alençon, Lisieux, Paris, de 570 kilomètres ; fils omnibus ; 12 février ; air froid, sec ; grand vent ; courants naturels de 15 à 20 degrés dans le fil isolé.

10 éléments Bunsen. . .	0″,022	60 éléments Bunsen. . .	0″,015
20 — — . . .	0″,019	80 — — . . .	0″,013
40 — — . . .	0″,017		

L'*augmentation* du nombre des éléments ou, autrement, de la tension de la pile a toujours produit une *diminution* dans la durée de l'état variable du courant; mais ces variations sont loin d'être inversement proportionnelles l'une à l'autre.

Même ligne, fils directs; 5 mai; isolement assez bon; temps très-beau, ciel très-pur; air calme; température de 10 à 12 degrés.

66 éléments Bunsen. . .	0″,018	150 éléments Daniell. . .	0″,018
44 — — . . .	0″,020	75 — — . . .	0″,020

D'après la mesure des forces électromotrices, 66 éléments Bunsen équivalent pour la tension à 100 éléments Daniell; on voit par là que l'augmentation de tension peut compenser le défaut de surface, lorsque l'isolement est suffisant.

Ligne de Paris, Tours, le Mans, Paris, de 550 kilomètres environ; 3 février; pas de vent; temps assez sec; température un peu inférieure à zéro.

20 éléments Bunsen. . .	0″,021	20 éléments à surface triple	0″,021
60 — — . . .	0″,018		

Cette dernière expérience montre que, quand le fil est bien isolé, et qu'on emploie une pile donnant une grande quantité d'électricité, une augmentation dans la surface n'apporte plus de diminution sensible dans la durée de la propagation.

Charge antérieure du fil. — D'après les données qui précèdent, il est évident que toutes les fois qu'on augmentera le travail que la pile doit effectuer pour amener l'état permanent du courant, la durée de l'état variable deviendra plus grande. C'est ce qui devra arriver si, par exemple, au lieu de ramener le fil à l'état naturel après chaque contact avec la pile, on lui donne une charge de

nom contraire. L'expérience a confirmé cette déduction. Le 3 mars, avec la ligne de 570 kilomètres, fils omnibus, 150 éléments Daniell donnaient, quand le fil se déchargeait par les deux bouts, 0″,023; en chargeant dans l'intervalle des contacts le fil de ligne avec le pôle de nom contraire d'une pile de 20 éléments Bunsen, le nombre est devenu 0″,038, et en chargeant avec le pôle de même nom, 0″,018.

Ainsi, une charge de même nature que celle du courant abrége la durée de la transmission, et une charge de nom contraire l'augmente. On en peut conclure que si l'on veut avoir une transmission télégraphique très-rapide, il ne faut pas, dans l'intervalle des contacts, décharger complétement le fil, et encore moins lui donner une charge de nom contraire. Il suffit d'affaiblir assez le courant du récepteur, pour que l'armature de fer obéisse à l'action du ressort antagoniste. Un faible courant négatif sera nécessaire, après le contact du pôle positif qui a produit le signal, pour diminuer brusquement l'intensité du courant; mais une charge négative égale et de nom contraire à la charge positive ferait perdre un temps relativement considérable.

Il est donc évident que dans les appareils Morse bavarois, où l'on se servait des inversions de courants pour produire les signaux sur deux lignes distinctes, on perdait par cet effet, en grande partie, l'avantage qui résultait de l'emploi de quatre signaux élémentaires différents.

Je crois qu'on peut employer utilement le courant de sens contraire, si l'on se borne à faire l'inversion entre les lettres et non entre les signaux élémentaires, par la simple raison que le temps qui s'écoule entre deux lettres successives est suffisant pour que le fil perde sa charge et en prenne une de nom contraire. Ce temps qui s'écoule

entre deux lettres serait, de cette manière, utilisé à changer l'état électrique du fil. Dans un système semblable, chaque lettre ayant deux significations, suivant qu'elle dérive du pôle positif ou du pôle négatif, le nombre des signaux serait doublé et l'on pourrait rejeter l'emploi des plus longs.

Les expériences qui précèdent sont toutes relatives à la durée de l'état variable. Si de chacune j'ai pu tirer une application à la transmission des dépêches, cela tient à ce que tous les phénomènes de cette période sont solidaires entre eux, et que si la durée en est amoindrie, le temps qu'il faut au courant pour produire un effet utile est diminué.

Cependant il sera bon de chercher, comme l'a conseillé M. Gaugain, le temps que le courant met à atteindre une fraction déterminée de son intensité finale; les expériences dirigées dans ce but se rattacheront très-directement à la télégraphie.

J'espère pouvoir bientôt faire des déterminations numériques de ce genre, non-seulement sur des fils de différentes longueurs, mais aussi sur des fils de même longueur et de diamètres différents. Des recherches semblables, poursuivies dans des conditions convenablement choisies, fourniront les données les plus précieuses, tant pour la théorie que pour la pratique.

Évaluation de la perte par l'air et par les supports.— Il suffit de placer la boussole successivement aux deux bouts de la ligne et de recueillir ses indications; près de la pile, la déviation est toujours plus forte qu'à l'autre extrémité, la différence des intensités correspondantes représente la perte. Dans le cas où l'on fait ces essais à deux stations différentes, on doit employer des boussoles aussi semblables que possible et facilement comparables. Il est souvent utile de soumettre le fil à une autre épreuve

qui consiste à placer la boussole près de la pile, et à isoler l'autre extrémité de la ligne. Si le fil ne perdait rien, l'aiguille recevrait une première impulsion pendant qu'il se charge, puis retomberait au zéro. Il arrive, au contraire, presque toujours qu'on a une déviation permanente; alors, si l'on met à la terre l'autre extrémité du fil, la déviation augmente. Cette comparaison des deux déviations donne une idée de la perte.

Nous avons eu l'occasion d'observer, M. Burnouf et moi, un phénomène singulier sur la ligne de Nancy, Paris, Troyes, Vesoul, Nancy, d'environ 890 kilomètres. En faisant l'essai dont il vient d'être question en dernier lieu, la déviation était la même, soit que l'extrémité du fil éloignée de la pile fût isolée, soit qu'elle fût en communication avec la terre. Il semblait donc que le fil perdait, tant par l'air que par les poteaux, la totalité du courant. On pouvait en conclure qu'en plaçant le galvanomètre à l'extrémité de la ligne il présenterait une déviation très-faible, et peut-être même nulle.

L'expérience a montré, au contraire, qu'il déviait sous l'influence d'un courant assez fort. Des essais semblables ont été répétés à Paris, par les temps les plus humides, sur la ligne de 570 kilomètres passant par le Mans, Lisieux ; très-souvent ils ont produit les mêmes résultats. Cette constance de la déviation, quand on ajoute une dérivation assez forte, semble être en désaccord avec les lois connues des courants dérivés, et ne peut s'expliquer que par l'intervention de phénomènes d'un autre ordre.

Si donc on voulait faire parler un récepteur d'une station en mettant une pile près de lui, et en fermant le circuit dans une station éloignée, l'appareil ne fonctionnerait que dans le cas d'un isolement assez bon ; dès que la perte deviendrait un peu grande, l'aimantation serait pro-

duite par un courant très-fort, sans variations sensibles.

Courants dans le fil isolé. — Les fils sont toujours parcourus par des courants très-faibles, dont l'intensité et le sens changent à chaque instant. Pour les observer, je réunis les deux bouts de la ligne par le fil d'un galvanomètre assez sensible, de façon à avoir un circuit isolé et sans communication avec la terre ni avec aucune pile. L'aiguille marque 10, 15 et 20 degrés d'un côté, elle oscille un instant de 15 à 20 degrés, pour retomber peu à peu au zéro, puis recommencer la même excursion dans un sens ou dans l'autre, et cela en quelques minutes. Souvent cette déviation est plus stable, et c'est alors qu'elle gêne le plus les expériences.

L'induction ou la dérivation dues à des courants voisins produisent des mouvements irréguliers, énergiques, brusques et saccadés de l'aiguille, qu'il est impossible de confondre avec ceux que je viens de décrire; car ceux-ci se traduisent par des oscillations lentes autour d'un certain point. Ces courants sont dus aux agents atmosphériques. Il sera sans doute bien difficile de déterminer d'une manière précise dans quelles circonstances ils se produisent.

III

Charge et décharge des fils.

Le conducteur télégraphique retient, après son contact avec le pôle positif de la pile, une charge d'électricité positive d'autant plus grande que le fil est plus long ; on appelle ordinairement *courant de retour* le courant momentané dû à cette charge électrique, s'écoulant par le bout du fil qui a reçu le contact de la pile.

Sur des fils aériens de quelques kilomètres, la charge

électrique est trop faible pour produire des effets appréciables dans les récepteurs ; mais dès que la longueur atteint 300 ou 400 kilomètres, la quantité d'électricité retenue est suffisante pour que le courant persiste un instant dans le fil de l'électro-aimant, après que le contact de la pile a été supprimé. Cette charge électrique gêne considérablement la transmission sur les fils de ligne de 500 ou 600 kilomètres. Il est donc très-important pour la télégraphie d'étudier avec soin les diverses circonstances qui accompagnent le retour du fil à l'état naturel.

Il est évident *à priori* que le fil met un certain temps pour acquérir sa charge électrique maximum. Une première question à résoudre consistait à déterminer si ce temps est le même que celui qui est nécessaire à l'établissement de l'état permanent. Le fil a été isolé par l'extrémité B et mis en contact par le bout A successivement avec le pôle de la pile, pendant un temps variable à volonté, puis avec le fil d'une boussole communiquant d'une autre part avec la terre. Ce dernier contact dure un temps assez long et supérieur à la durée de l'état variable. Les communications sont établies de la manière suivante : l'extrémité A du fil de ligne est fixée aux ressorts R et G‴ (fig. 3) du périodomètre ; F‴ G″ communique à la terre par l'intermédiaire du fil de la boussole. La ligne est ainsi mise successivement en contact avec la pile par la lame C, et avec le fil de terre par la lame G (fig. 3 et 4); cette lame étant d'ailleurs reliée par un fil métallique à la virole F′G′. L'expérience a donné les nombres suivants, sur la ligne passant par le Mans, Lisieux, de 570 kilomètres, fils directs.

1,5	3	4,5	6	8	10	11	13	15	16	18	20	24	25
5°,5	7°	7°,5	8°,5	9°	9°,5	9°,7	10°	10°	10°,7	11°	11°	11°	11°

La déviation maximum de 11 degrés due à la dé-

charge du fil a lieu lorsque la pile a été en contact avec le fil pendant 0,018 de seconde, qui est la durée de l'état variable.

On voit d'après ces nombres que *la charge électrique du fil augmente graduellement avec la durée du contact de la pile, et qu'elle atteint son maximum, après un temps égal à celui qu'il faut pour l'établissement de l'état permanent.*

Le fil n'a pas été placé dans les conditions de la pratique, puisqu'il a reçu sa charge électrique pendant qu'il était isolé en B. Il aurait fallu une modification particulière de l'appareil pour que la communication à la terre fût établie et supprimée en même temps que le contact de la pile. Il est probable qu'une expérience faite de cette manière donnerait le même résultat.

Durée de la décharge du fil. — Dans nos expériences de Toulouse, août 1854, M. Burnouf et moi, nous avions constaté que le fil perd l'électricité moins vite qu'il ne la prend, et qu'il met un temps fort long pour revenir à l'état naturel. Des études nouvelles sur ce sujet ont confirmé ce que nous avions vu à cette époque.

Ce qui précède démontre que la durée de l'état variable est le temps nécessaire pour la charge complète du fil. Il s'agit donc de savoir quelle est la durée de l'état variable qui suit la rupture du courant, ou autrement quel est le temps qu'il faut pour décharger le fil quand il a reçu sa charge maximum? Comme il est difficile de déterminer le moment où le fil a perdu complétement son électricité, il faut préciser la question.

On s'est assuré préalablement que le courant met $0'',0002$ à faire dévier de $0^{\circ},25$ le galvanomètre placé au bout du fil éloigné de la pile, et $0'',017$ pour atteindre l'état permanent; combien de temps doit-il s'écouler après que le contact de la pile a cessé, pour qu'un galvanomètre placé dans

des conditions identiques à l'extrémité du fil ne dévie plus que de 0°,25 sous l'influence de la décharge électrique? L'expérience a donné le nombre 0″,062. On peut donc dire qu'il faut au courant un temps exprimé par 0″,0170 — 0″,0002 ou 0″,0168 pour passer de l'intensité 0°,25 à son intensité maximum, et 0″,0620 (nombre environ quatre fois plus grand), pour revenir de son intensité finale à la première 0°,25.

Ce résultat peut s'exprimer en quelques mots, en disant que le fil de 570 kilomètres met environ quatre fois plus de temps à se décharger qu'à se charger.

Voici quelques nombres qui complètent l'expérience précédente; ils montrent la marche décroissante du courant provenant de la décharge à l'extrémité du fil éloignée de la pile. Un galvanomètre a été introduit par dérivation sur le fil qui conduisait à la terre le courant dû à la décharge.

3	5	8	11	14	17	21	25	62
7°,5	5°,5	5°	4°	3°	2°,5	2°,25	1°,6	0°,25

La lenteur de la décharge du fil est plus nuisible à la vitesse de la transmission sur les longues lignes que le temps nécessaire à l'émission du courant. On diminue cet inconvénient en mettant à la terre, après chaque contact de la pile, l'extrémité du fil qui a reçu le courant; ou mieux encore en neutralisant partiellement sa charge positive par un faible courant négatif. Ce point sera développé dans le quatrième chapitre.

Induction dans les fils télégraphiques. — Nos expériences de Toulouse nous ont montré qu'un fil de ligne exerce une induction sensible sur les fils voisins, lors même qu'il en est séparé par une distance de 30 ou 40 centimètres. Nous n'avons essayé que le courant de ferme-

ture; il serait intéressant de reprendre ces expériences et de voir ce que produit le courant de rupture. Voici, en quelques mots, les phénomènes que nous avons observés. Deux fils bien isolés marchent parallèlement de Toulouse à Foix, sur une longueur de 82 kilomètres. Quatre roues (fig. 6) portant sur leurs surfaces des lames conductrices et des lames isolantes, établissent simultanément en A le contact de la pile, et en A′ celui d'un fil de terre T″ qui contient un galvanomètre G. Lorsque, par l'effet de la rotation, ce double contact est supprimé, les roues amènent deux fils de terre T′ et T‴ en A et en A′, pour décharger les deux conducteurs isolés. Or, il arrive que le galvanomètre est dévié dès que l'appareil tourne, la déviation augmente avec la vitesse de rotation et atteint un maximum qui persiste pour toutes les vitesses plus grandes. On s'assurait préalablement qu'il ne passait rien d'un fil à l'autre, en établissant d'une manière permanente le contact de la pile en A et du galvanomètre en A′. Les deux fils étaient très-rapprochés l'un de l'autre en sortant de la ville, sur une longueur de plusieurs kilomètres, aussi l'induction était très-forte. Une expérience semblable, tentée sur des fils de 110 kilomètres chacun, allant de Toulouse à Carcassonne, a donné le même résultat, avec cette différence que le courant induit était moins intense, les fils n'étant près l'un de l'autre que sur une petite longueur de 300 à 400 mètres.

Les fils de 82 kilomètres, étendus de Toulouse à Foix, ont été rétablis dans leur disposition première; puis les deux fils de terre T et T″ ont été supprimés et remplacés par les deux fils de Carcassonne, bien isolés l'un de l'autre, et des corps avoisinants.

Pendant la rotation de l'appareil, le galvanomètre était dévié par un courant induit, développé *sans aucun circuit fermé*. Il serait intéressant d'étudier avec plus de détails

des courants induits développés dans des conditions semblables.

En résumé, le courant décroissant qui suit la fermeture, près de la pile, détermine un courant induit notable dans les fils voisins. Les observations pratiques font voir que ces courants induits sont en général trop faibles pour faire marcher les appareils. Cependant il est bon de se rappeler qu'un fil exerce de l'influence sur un autre, non-seulement par voie de dérivation, dans les temps humides, mais aussi par voie d'induction électro-dynamique, lorsqu'un bon isolement ne permet pas les dérivations.

Il n'est pas utile de rapporter ici les expériences nombreuses que j'ai faites à la station de Paris, relativement aux courants induits qu'on développe lorsqu'on prend le fil de ligne comme fil inducteur; la description détaillée de ces recherches m'écarterait trop de mon sujet; j'énoncerai seulement une conséquence pratique que la théorie pouvait facilement faire prévoir.

Il ne faut pas employer un appareil d'induction dont le fil inducteur soit gros et court, lorsqu'on veut avoir des courants induits au moyen des fils télégraphiques; on n'aurait que des courants extrêmement faibles. C'est ce qui arrive quand on essaye d'employer à cet usage l'appareil Ruhmkorff, si puissant d'ailleurs. Pour avoir des effets appréciables, on est obligé de faire construire des bobines où le fil inducteur soit aussi long que le fil induit. Avec des appareils semblables, j'ai observé des renversements singuliers dans le courant induit de fermeture près de la pile; et, comme il était naturel de le penser, j'ai constaté que l'induction ne se produit que pendant l'état variable du courant.

Les courants induits sont très-faibles, même avec les appareils les mieux appropriés à cet usage. Il serait donc

bien difficile de faire marcher un récepteur par le courant induit développé au bout d'une ligne un peu longue, comme on l'a parfois proposé.

IV

Influence de la loi de propagation sur la vitesse des transmissions.

La connaissance des lois de la propagation du courant va nous permettre d'étudier avec détail ce qui se passe dans la transmission des signaux, et de rechercher quelles sont les meilleures conditions à remplir pour avoir autant de sécurité et de rapidité que possible.

Temps nécessaire à la transmission d'un signal. — Le périodomètre donne le moyen de déterminer le temps qui s'écoule entre le moment où l'on établit le contact de la pile et du fil, et l'instant précis où l'armature du récepteur commence à se mouvoir. Voici la disposition qui réussit le mieux :

Le pôle de la pile communique avec la lame C (fig. 3) par le ressort C″; le fil de ligne est fixé en R; le récepteur de MM. Digney est placé à l'extrémité de la ligne, d'après les règles ordinaires, avec une communication à la terre. On dispose un petit circuit local contenant un élément Daniell, un galvanomètre, l'isolé, le *levier* et le massif du récepteur. Les deux bouts de ce circuit vont : l'un au ressort E, et l'autre au ressort E″.

Le galvanomètre n'est évidemment dévié qu'au moment où le contact est rétabli à la fois dans les deux interruptions du circuit local, c'est-à-dire quand le levier touche l'isolé, et que le ressort E touche la lame E_1. Le cylindre faisant 15 tours par seconde, d'un mouvement

uniforme, le galvanomètre n'est point dévié si le ressort R est vers les parties larges de la lame C, attendu que le circuit local est déjà ouvert entre le levier et l'isolé, lorsque le ressort E presse la lame E_1. Alors on réduit peu à peu la durée du contact de la pile en poussant graduellement le ressort R vers les parties étroites de la lame C. Il arrive bientôt un moment où le galvanomètre du circuit local est traversé par le courant de l'élément Daniell; cela a lieu quand le temps qui s'écoule entre les deux contacts du ressort R et de la lame C, du ressort E et de la lame E_1, n'est pas tout à fait suffisant pour que l'armature se mette en mouvement. Il suffit alors de pousser le ressort R d'une division vers les parties larges, pour faire cesser la déviation. C'est une moyenne entre ces deux positions du ressort qui donne la durée du phénomène. On connaît l'intervalle de temps cherché en évaluant, comme précédemment, la durée des contacts, au moyen de la longueur des arcs parcourus et de la vitesse de rotation.

Cette expérience montre que le temps nécessaire à la transmission d'un signal n'est à peu près que de 0,01 de seconde, sur une ligne de 570 kilomètres, lorsque la pile est un peu énergique, le fil bien isolé et le ressort du récepteur très-peu tendu.

L'emploi comparatif, dans ces dernières recherches, des piles de Bunsen et de Daniell, a donné des résultats confirmatifs des propositions énoncées précédemment sur la durée de l'état variable du courant. Ainsi, l'attraction de l'armature du récepteur se fait dans un temps moindre quand on augmente la surface de la pile, ou, ce qui revient au même, quand on substitue à une pile de Daniell une pile de Bunsen de même tension. L'effet est d'autant plus marqué que le fil est plus mal isolé. Dans le cas d'un bon isolement, on gagne davantage à augmenter

le nombre des éléments, ou, autrement, la tension de la pile. Ce résultat est tout à fait conforme à ceux qui ont été précédemment énoncés (p. 22 et 23).

Depuis que ces expériences ont été publiées (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 2 septembre 1861), on a constaté de nouveau l'avantage des éléments à grande surface sur le câble d'Alger à Port-Vendres.

Un procédé semblable m'a permis d'évaluer l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant où l'on supprime le contact de la pile et le moment où l'armature cesse d'être retenue par l'électro-aimant. Cette fois encore toutes les expériences ont servi de vérification à ce qui a été dit dans le chapitre précédent, sur la lenteur de la décharge du fil de ligne.

En résumé, je suis resté convaincu, d'après tous ces faits, dont l'ensemble démontre la grande rapidité des variations de l'état électrique du fil, qu'il est possible de transmettre, sur une ligne de 500 à 600 kilomètres, beaucoup plus de trente à trente-cinq mots par minute, nombre limite qui paraissait résulter de l'essai de plusieurs manipulateurs automatiques.

Déjà il a été dit précédemment qu'il existe une grande différence entre les expériences de cabinet où l'on place des bobines résistantes pour unir la pile au récepteur, et celles qu'on fait dans les conditions de la pratique, au moyen du fil de ligne. Cette différence subsisterait même avec un fil parfaitement isolé, dont la continuité métallique serait bien établie partout; elle tient à la loi de propagation du courant et à la charge électrique du fil, laquelle prolonge la durée de l'aimantation en se déversant dans le sol, par l'intermédiaire du fil de l'électro-aimant. Je ne saurais trop insister sur cette question importante, qui me paraît être le point de départ d'une

grande partie des progrès à réaliser en télégraphie électrique. Voici, en quelques mots, les points les plus essentiels.

La loi de propagation déduite de la théorie d'Ohm, vérifiée d'une manière générale par ce qui précède, consiste à dire que *la durée de l'état variable est inversement proportionnelle à la section et directement proportionnelle au carré de la longueur du fil conducteur*. Cette loi va nous montrer pourquoi la transmission des signaux est plus facile par des fils d'un faible diamètre que par des fils de ligne d'une égale résistance.

Soit, par exemple, un fil de ligne de 4 millimètres de diamètre et de 600 kilomètres de long. Un fil de même nature, de même longueur, et de 1/4 de millimètre de diamètre, c'est-à-dire d'une section 256 fois plus petite, donnera, d'après la loi de la section, une durée d'état variable 256 fois plus grande. Mais si nous ne prenons dans ce fil que la 256ᵉ partie de sa longueur (2,344 mètres), la durée de l'état variable, d'après la loi de la longueur, sera diminuée dans le rapport de $1/256^2$; elle sera donc en définitive dans ce fil la 256ᵉ partie de ce qu'elle est dans le fil de ligne.

Or, ce petit fil offre au courant permanent la même résistance que le fil de ligne; il en résulte que la durée de l'état variable est moindre dans un fil d'un petit diamètre que dans un gros fil également résistant.

C'est là une première raison pour laquelle la transmission est plus rapide dans le fil d'un petit diamètre; mais à cela vient s'ajouter une autre cause, plus efficace encore : c'est que sa charge électrique très-faible est presque insensible, tandis que celle du fil de ligne de 600 kilomètres est capable de produire des effets très-intenses.

Ainsi, en résumé, il y a, par l'intervention du fil télé-

graphique, un retard dans l'attraction de l'armature de l'électro-aimant, et à ce retard vient s'en joindre un autre plus considérable provenant de la lenteur de la désaimantation due à la charge électrique du fil.

La loi qui vient d'être énoncée nous montre que, *dans des fils de même nature, de diamètres différents, mais également résistants, la durée de l'état variable est directement proportionnelle à la section.* Cette proposition conduit à la suivante, qui n'en est que la reproduction sous une autre forme : *La durée de l'état variable est la même* pour des fils formés avec *une même substance et géométriquement semblables entre eux.*

Après avoir énuméré les difficultés que la ligne oppose à la transmission des signaux, et exposé les phénomènes physiques qui les expliquent, je vais chercher par quel moyen on peut obvier à ces inconvénients.

Occupons-nous d'abord de la transmission du signal élémentaire le plus simple, c'est-à-dire du *point.* Nous trouverons des règles qu'il sera ensuite facile d'appliquer à l'impression des *traits*, ou d'une série quelconque de *points et de traits.*

Nombre maximum de points transmis en une seconde. — Le périodomètre peut servir de manipulateur. Le contact de la pile et du fil de 570 kilomètres est établi par la lame C, le pôle positif est en C″, et le fil de ligne touche le ressort R. La lame de décharge D est d'abord isolée, puis mise directement en communication avec la terre pour décharger le fil de ligne. Enfin, dans une autre expérience, elle communique avec le pôle négatif d'une pile dont l'autre pôle est à la terre. Dans ce dernier cas, la charge positive du fil est neutralisée par une faible charge de nom contraire.

L'appareil donne 15 points par seconde, lorsque le cylindre fait 15 tours dans le même temps; le déroulement

de la bande de papier étant, comme à l'ordinaire, de $1^m,20$ à $1^m,30$ par minute. Pour un certain état d'isolement de la ligne, pour une pile donnée et une tension déterminée du ressort antagoniste, on a la plus grande netteté possible dans l'impression des points, quand le ressort R presse une certaine partie de la lame de charge C.

Lorsque l'isolement est meilleur ou la pile plus forte, au lieu de points distincts il vient un trait continu ; mais on fait reparaître facilement les points en poussant le ressort R vers les parties étroites de la même lame. Quand, au contraire, l'isolement est plus imparfait ou la pile plus faible, les points s'effacent, mais ils deviennent de nouveau très-nets si l'on ramène le ressort vers les parties larges. De cette manière on obtient de 16 à 18 points par seconde, ce qui correspond à une vitesse de transmission de 32 à 36 mots par minute.

Dans cette expérience, quand on pousse le ressort vers les parties larges de la lame de charge, la durée des contacts augmente et celle de la décharge diminue. Si on le pousse vers les parties étroites, c'est l'inverse qui a lieu. Dans le premier cas on remédie au défaut d'isolement de la ligne ; dans le second cas on complète la décharge.

Etant donnée une pile d'une force constante, on peut énoncer la règle à suivre en ces termes : *Augmenter le rapport de la durée des contacts aux intervalles de temps qui les séparent, quand l'isolement de la ligne devient mauvais ; diminuer ce rapport dans le cas contraire.*

Ces premiers essais n'avaient donné que la transmission d'environ 35 mots par minute, qu'on regardait alors comme la plus grande qu'on puisse obtenir sur des lignes de 500 ou 600 kilomètres. Je m'assurai qu'en supprimant toute résistance entre le récepteur et la pile on atteint sans peine 40 points par seconde, ou environ 60 mots en

une minute; il fallait donc voir s'il était possible d'éliminer le retard introduit par le fil de ligne.

Les appareils ne déroulent en moyenne que $1^m,20$ de bande de papier par minute. Ce déroulement paraissant très-faible, j'ai dû rechercher ce qu'on gagnerait à l'augmenter. A cet effet, j'ai lié les ailes du volant régulateur du mouvement d'horlogerie, de manière à avoir une vitesse de déroulement de 4 mètres par minute. Cette modification a donné des points plus longs, séparés par de plus grands intervalles, sans avantage notable pour leur nombre, qui n'a pu être porté au delà de 18 ou 20 par seconde.

C'est alors que la lame de décharge C a été mise en communication avec la terre. La vitesse de rotation a été portée d'abord à 30, puis à 35 tours par seconde, et l'on a trouvé, pour chacune de ces vitesses, une position particulière du ressort qui donnait une bonne transmission.

Il résulte de là qu'on augmentera considérablement la vitesse de transmission, en établissant dans l'intervalle des contacts de la pile une communication du fil à la terre, mais à condition de régler convenablement les contacts.

Au lieu de décharger le fil dans l'intervalle des contacts, on peut détruire son isolement dans un point qui avoisine la pile, par une communication imparfaite à la terre; on a, dans ces conditions, 25 ou 30 points par seconde. Ce fait indique qu'il ne sera pas nécessaire de décharger le fil par les temps humides, puisqu'il perd spontanément sa charge électrique, à cause du mauvais isolement. Il faut bien savoir, cependant, que dans de semblables conditions la transmission ne sera jamais ni aussi rapide ni aussi sûre qu'avec un fil bien isolé, et qu'on ne saurait trop prendre de précautions pour empê-

cher les pertes du courant dans toute l'étendue de la ligne.

Neutralisation de la charge du fil par un courant négatif. — Le levier du récepteur a été remplacé par un levier plus léger, qui donnait, en l'absence de toute résistance extérieure, 50 points par seconde. L'emploi de la ligne de 570 kilomètres réduisait le nombre des signaux à 35, quand la lame D communiquait avec la terre. Alors le nombre des points a été porté à 50 par seconde lorsqu'on a introduit une pile de 10 éléments Bunsen dans le fil de terre D″T″, en tournant le pôle négatif vers la lame D.

On fera donc disparaître en grande partie le retard que le fil de ligne apporte à la transmission : 1° *en établissant un rapport convenable entre la durée du contact de la pile et l'intervalle de temps qui sépare deux contacts*[1] ; 2° *en neutralisant la charge électrique du fil par un faible courant de sens contraire.*

Cette transmission de 3,000 points par minute correspond à plus de 60 mots. C'est la plus grande rapidité que j'aie pu avoir avec la ligne de 570 kilomètres passant par le Mans, Lisieux (fils directs). Les lignes d'une longueur moindre que 500 kilomètres transmettent près de 80 mots en une minute par les mêmes procédés.

Il est facile de produire des traits en changeant le rôle des deux lames portées par le cylindre. On établit le courant au moyen de la large lame D; l'autre lame C sert à décharger le fil. Une position déterminée du ressort donne pour chaque état de la ligne la meilleure transmission.

En général, les traits sont suffisamment distincts des points, lorsqu'on emploie un temps double à les produire ;

[1] La valeur de ce rapport dépendant de l'état d'isolement de la ligne, de sa longueur, de son diamètre et de l'énergie de la pile.

ainsi 40 points supposent 20 traits; la lecture devient encore plus facile si l'on n'en fait que 16 ou 18.

Nombre maximum de mots transmis en une minute. — Ces tentatives sur la transmission des signaux élémentaires seraient insuffisantes si elles n'avaient été suivies d'expériences dans lesquelles on a intercalé les points et les traits d'une façon quelconque.

En moyenne, les mots français ont cinq lettres; chaque lettre est formée de deux points et d'un trait. Les deux mots *France*, *Paris*, qui contiennent 20 points et 10 traits, représentent la moyenne des mots français dans l'alphabet Morse.

Ces deux mots ont été inscrits sur un petit transmetteur (fig. 7), formé de quatre roues de laiton de $0^{m},25$ de circonférence, portées sur un même axe et communiquant toutes avec le fil de ligne. Les points sont produits par la roue P, les traits par la roue T; D sert à décharger le fil après chaque point, et D′ après chaque trait; les contacts des traits sont trois fois plus larges que ceux des points. Les lames qui servent à décharger le fil occupent la majeure partie de l'espace compris entre les autres; les parties métalliques sont ombrées; les intervalles isolants laissés en blanc sont remplis par du buis. Deux ressorts RR′ établissent les communications de la pile avec la ligne qui est fixée en L; deux autres SS′ déterminent le contact du pôle négatif de la pile qui sert à la décharge.

Les contacts ont la forme de trapèzes, dont l'un des bords est dirigé suivant la génératrice de la surface cylindrique. Pour ceux qui établissent le courant, le mouvement de rotation ayant lieu dans le sens indiqué par la flèche, c'est par ce bord que le contact commence. Pour les lames qui servent à la décharge, c'est au contraire le bord oblique qui passe le premier sous les ressorts.

On fait mouvoir ensemble les ressorts S, R, solidaires entre eux; de même S′, R′ se déplacent ensemble. La durée du contact de la pile et celle de la décharge sont aussi complémentaires l'une de l'autre.

Cette simple disposition permet d'assujettir le transmetteur aux règles précédemment établies.

Admettons que l'appareil ait été une première fois mis en harmonie avec la force de la pile, la tension du ressort, l'état de la ligne, et que la transmission soit très-nette lorsque les roues font 30 tours par minute; si, à un certain moment, l'isolement devient plus mauvais, les signaux sont moins marqués et les points font défaut; on rétablit alors la régularité de la transmission en poussant les ressorts vers les parties larges des lames P et T. Quand, au contraire, l'isolement devient meilleur, les signaux s'allongent et finissent par se réunir; il suffit, dans ce cas, de pousser le ressort en sens contraire pour les séparer et leur rendre leurs dimensions primitives.

Dans l'intervalle des lettres, le fil perd de sa charge électrique une quantité plus grande qu'entre deux signaux élémentaires successifs, ce qui oblige à augmenter notablement l'étendue du premier contact de chaque lettre (fig. 7). Sans cette précaution, le signal qui commence deviendrait trop petit, et pourrait même manquer dans le cas où ce serait un point. Ce fait d'expérience indique bien clairement l'inconvénient qui se présenterait si on voulait faire des lettres au moyen de signaux produits par des courants de sens contraire (p. 24).

Entre deux mots, l'espace est encore plus grand; il n'est cependant pas indispensable d'augmenter davantage l'étendue des contacts qui commencent le mot. Cela tient à ce que le fil perd une partie de sa charge électrique, de moins en moins grande, dans le même temps, à mesure qu'on

s'éloigne du moment où le contact de la pile a cessé.

L'expérience a montré qu'il est nécessaire, pour les transmissions rapides, d'avoir une pile plus forte qu'à l'ordinaire, en tension et en quantité. Quand l'isolement est bon, la pile de Daniell, usitée en télégraphie, est suffisante, sauf à porter de 90 à 100 le nombre des éléments, pour 500 ou 600 kilomètres. Mais dès que l'isolement est médiocre, il faut prendre des éléments Daniell de plus grande dimension, ou bien une pile de Bunsen, de 50 ou 60 éléments.

Il résulte de tous les faits énoncés dans ce mémoire que la résistance de la pile nuit à la transmission, quelle que soit la longueur des fils. Des éléments de grande dimension auront, dans tous les cas, un avantage marqué sur des éléments plus petits; le seul inconvénient qu'ils puissent présenter, c'est d'occasionner une dépense plus grande. La pile dont le pôle négatif sert à neutraliser la charge électrique du fil de ligne doit contenir quatre ou cinq fois moins d'éléments que celle qui effectue la transmission. On pourrait, dans l'usage, appeler l'une des deux *pile à courant négatif*, et l'autre *pile à courant positif*, ou même *pile positive* et *pile négative*.

Je terminerai en exposant les résultats obtenus sur plusieurs lignes de différentes longueurs, qui ont été mises à ma disposition par ordre de M. le vicomte de Vougy, directeur général des lignes télégraphiques, à qui revient l'initiative de ces travaux pratiques.

Le fil de 570 kilomètres ne laissait passer, par un temps favorable, que 18 fois les 2 mots, soit 36 mots par minute, quand la décharge ne fonctionnait pas. En unissant les ressorts S, S′ à un fil de terre, on transmettait près de 60 mots; ce nombre a été dépassé par l'emploi de la pile à courant négatif.

Lorsqu'il pleuvait sur toute la ligne, quoiqu'il n'arrivât à destination que la septième partie du courant, on passait encore facilement 40 ou 50 mots par minute, au moyen de 60 éléments Bunsen. Ici les roues de décharge cessent d'être nécessaires, le fil perdant très-rapidement sa charge électrique.

Un fil allant au Havre et revenant à Paris, d'une longueur totale de 450 kilomètres, assez bien isolé, laissait passer, au moyen des mêmes procédés, 75 mots par minute, avec 30 éléments Bunsen. Cette ligne a été réunie à celle de 570 kilomètres, de manière à former un circuit unique de 1,020 kilomètres; la transmission s'élevait encore à 36 mots par minute avec 100 éléments Bunsen. La pile à courant négatif était ici tout à fait nécessaire.

Un relais fut intercalé entre les deux fils, dont nous avions les quatre extrémités dans le poste central; la pile de 100 éléments fut divisée en deux parties : 40 pour le fil de 450 kilomètres, et 60 par l'autre. Dans ce premier essai, la transmission par le relais a été de moins de 36 mots, et l'impression n'était pas très-régulière; le relais paraît donc être une cause de retard. Il sera intéressant d'appuyer cette comparaison sur de nouveaux faits, en choisissant les relais les plus mobiles.

Nous avions pris pour communication à la terre les tuyaux de conduite des eaux de la ville et un fil armé d'une longue lame de fer-blanc plongeant dans un puits. Des expériences antérieures avaient démontré que le courant ne revient pas par le sol, et qu'en prenant deux fils de terre dans le même poste, on se trouve dans les mêmes conditions que si le fil, étendu en ligne droite, touchait la terre par ses deux bouts. Quoique je fusse convaincu d'être à l'abri d'une semblable cause d'erreur, pour éviter toute objection, ces expériences ont été répétées de Paris

à Nancy, sur une ligne de 360 kilomètres, avec une communication à la terre dans chacune de ces deux villes. M. E. Burnouf recevait à Nancy au moyen d'un récepteur dont la vitesse de déroulement était de 4 mètres par minute. La transmission a été portée de 36 à 60 mots; elle se faisait encore assez bien à 72 mots par minute; les points passaient avec une grande régularité, à raison de 40 par seconde. Nous étions là rigoureusement dans les conditions de la pratique, et le résultat a été le même que dans les autres expériences.

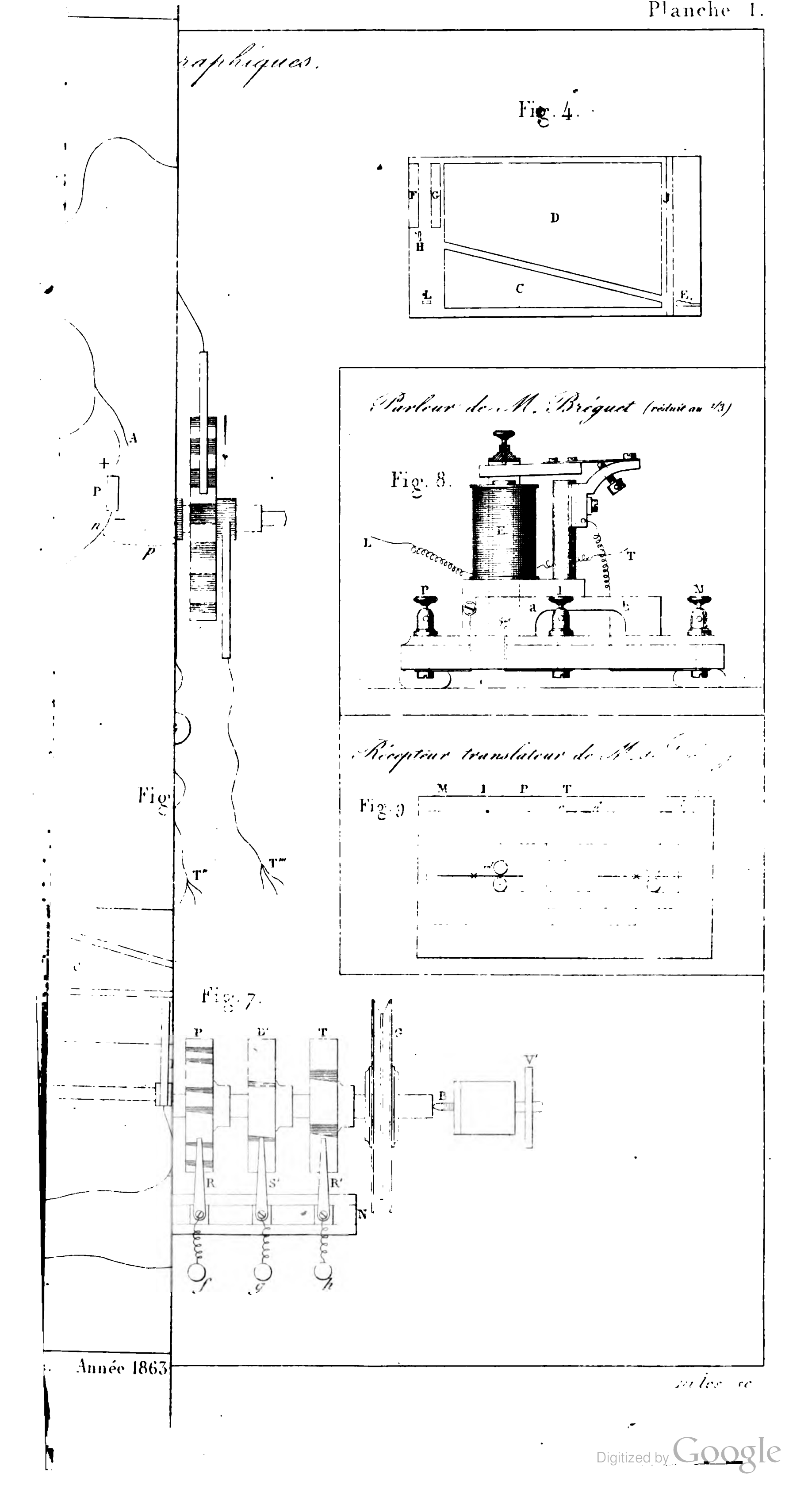
Conclusions. Le but de ce mémoire est de démontrer que, sur les lignes de 500 à 600 kilomètres, le courant permet une transmission cinq ou six fois plus rapide que celle des employés, dont la moyenne va tout au plus à 15 mots par minute. Le système Morse est supérieur aux autres, au point de vue de la rapidité de la transmission. En effet, dans les appareils qui donnent la lettre en caractères romains, le nombre des révolutions, dans une minute, de l'aiguille indicatrice et de la roue des types est limité non-seulement par le temps qu'il faut au courant pour se propager et produire un effet déterminé, mais encore par le temps nécessaire au jeu des différentes pièces. La transmission n'est pas instantanée, et le mouvement de l'armature ne s'accomplit pas quand le contact a trop peu de durée.

Il en résulte qu'un temps relativement considérable est perdu dans l'intervalle de deux lettres qui se succèdent suivant un ordre quelconque.

On objectera que, dans le système Morse, trois courants d'inégale durée sont nécessaires pour une lettre, tandis que d'autres appareils donnent une lettre à chaque émission de courant. Mais il faut remarquer que cet inconvé-

NOTE SUR L'APPAREIL REPRÉSENTÉ FIGURE 3.

Le ressort R est en communication avec la règle métallique RE, à laquelle on fixe le fil télégraphique. Le ressort E est porté par la même règle, dont il est isolé au moyen d'une lame d'ivoire. On peut déplacer ce ressort de quelques divisions, de manière à le faire passer sur une partie plus ou moins large de la lame de dérivation E_1 ; dans le cours d'une même expérience il reste fixe, l'autre ressort R est seul mobile. — Les lames de la surface du cylindre communiquent avec les viroles marquées d'une même lettre accentuée, et les ressorts qui passent sur les viroles ont un double accent. Les étouffoirs n'out pas été représentés; leur pression doit être uniforme pendant toute la durée d'une expérience. — Quand on étudie les lois de la propagation sur des lignes de plus de 600 kilomètres, il est nécessaire de former le circuit par la réunion de plusieurs circuits partiels, dont on a les deux extrémités dans le poste. Le fil doit être déchargé par toutes ces extrémités; à cet effet, on les fixe aux ressorts F''', G''', et l'on amène un fil de terre en F''G''. — La poulie L porte cinq gorges qui servent à varier la vitesse de rotation du cylindre. Les coussinets ZZ doivent être souvent nettoyés et huilés.— Les ressorts laissent sur le bois des traces métalliques, qu'on enlève avec du papier à l'émeri très-fin. Il est même indispensable de porter de temps en temps le cylindre sur le tour et d'enlever avec le ciseau une couche très-mince.— La durée des contacts est mesurée après chaque séance d'expérience, en fermant un circuit, contenant un élément de pile et un galvanomètre, au moyen des ressorts et des lames métalliques de la surface du cylindre. On imprime un mouvement de rotation très-lent au cylindre, au moyen d'une vis, et l'on a facilement la valeur des contacts à 1/10 de degré près. — Le galvanomètre doit être très-sensible; on le choisit à fil long et fin, avec un système astatique d'aiguilles aimantées, suspendu à un fil de soie. L'oscillation simple doit durer de 5 à 10 secondes.— Pour abréger la durée des expériences, il est nécessaire de lancer dans le galvanomètre des courants très-faibles, de manière à diminuer l'amplitude des oscillations en contrariant les mouvements du système astatique. On peut, sans attendre l'immobilité de l'aiguille, avoir le nombre cherché, en prenant la moyenne des petites oscillations.


raphiques.
Fig. 4.
F
G
D
J
H
C
L
E
A
+
P
n
p
Parleur de M. Bréguet (réduit au 1/3)
Fig. 8.
E
L
T
P
I
M
a
b
Récepteur translateur de M.
Fig. 9
M
I
P
T
Fig
T''
T'''
Fig. 7.
P
T
R
S'
R'
N
V'
B
f
g
h

Paris. — Typographie Hennuyer, rue du Boulevard, 7.

